

IKONOS 위성영상의 외부표정요소로부터 정합선 수립에 의한 DEM 생성 DEM Generation by the Matching Line Using Exterior Orientation Parameters of the IKONOS Geo Imagery

이호성¹⁾ · 안기원²⁾

Lee, Hyo Seong · Ahn, Ki Weon

Abstract

This study determines the optimum polynomial of exterior orientation parameters(EOPs) as a function of line number of linear array scanner. To estimate priori EOPs, meta data of IKONOS scene and ground control points are used. We select a first order polynomial and a constant for position elements modeling and rotation elements modeling. Positioning accuracy of the determined EOPs is compared with that of RPCs bias-corrected by the least squares adjustment. There is almost no difference between accuracies of the two methods. To obtain digital elevation model(DEM), matching line is established by the EOPs. The DEM is compared with DEM generated by ERDAS IMAGINE software, which utilizes the bias-corrected RPCs. Height differences of DEMs by the two methods are ranged within a allowable standard deviation. The produced DEM, therefore, shows accuracy similar to the verified method.

Keywords : Exterior orientation parameters, Matching line, Digital elevation model

초 록

본 연구는 IKONOS 위성영상의 메타자료와 지상기준점으로부터 라인변화에 따른 외부표정요소의 최적 다항식 모델을 결정하였다. 외부표정요소의 위치요소는 일차다항식, 회전요소는 상수항을 최적 다항식으로 결정하였다. 그리고 결정된 외부표정요소의 위치결정 정확도는 기존의 검증된 방법 즉, 최소제곱법에 의한 RPC 편의보정 방법과 비교하였다. 그 결과, 두 방법에 의한 정확도는 거의 차이가 없었다. 결정된 외부표정요소로부터 정합선을 수립한 후, 수치표고모델을 작성하여, RPC 편의보정 방법이 적용된 ERDAS IMAGINE에 의한 DEM과 비교·검토하였다. 그 결과로써, 제안방법과 ERDAS IMAGINE으로 작성한 수치표고모델의 높이차이는 허용 표준편차 범위 내에 존재하였다. 따라서 본 연구에서 제작한 수치표고모델은 기존의 검증된 방법과 유사한 결과 정확도를 나타냈다.

핵심어 : 외부표정요소, 정합선, 수치표고모델

1. 서 론

21세기 항공우주기술은 지구로부터 수백 km 떨어진 공간에서도 1m 이하의 크기를 가진 대상물을 식별할 수 있을 정도로 발전하게 되었으며, 이렇게 획득한 영상물을 일반인에게 공개토록 상용화하고 있다. IKONOS-2, QuickBird-2를 비롯한 1m 이하 급 여러 고해상도 위성영상들은 지구와

하뿐만 아니라 군사·방위, 미디어 등의 목적에도 유용하게 활용되고 있으며, 지금까지 계획하지 못했던 새로운 분야에 활용영역을 확대해 나갈 것이라 판단된다(OGC, 1999). 우리나라에서도 2006년 7월 28일에 IKONOS 위성과 동일한 해상도의 KOMPSAT-2(다목적 실용위성 2호)가 성공적으로 발사 되었으며, 국내 지상국과의 교신에 성공하여 영상을 제공할 예정이다 있다. 이 영상자료는

1) 정회원 · 순천대학교 토목공학과 조교수(E-mail:hslee@sunchon.ac.kr)

2) 연결저자 · 정회원 · 경상대학교 토목공학과 교수, 경상대학교 공학연구원 책임연구원(E-mail:kwahn@snu.ac.kr)

해상도가 항공사진과 거의 비슷하고, 가격 또한 수입영상보다 훨씬 경쟁력이 있을 것이라 예상되기 때문에 향후 몇 년 후, 수치지도 제작분야에 적극 활용될 것이라 판단하며, 이를 토대로 우리나라의 국토 개발계획과 유지관리에 있어서 보다 종합적이고 체계적인 의사결정 수단으로 활용할 수 있을 것이다.

최근 고해상도 위성영상을 이용한 위치정보 획득관련 연구는 주로 IKONOS 위성영상을 중심으로 진행되어 왔다. 이 영상은 위성궤도의 위치정보를 제공하지 않고, Rational Polynomial Coefficient(RPC)만을 제공하기 때문에 하위레벨 영상의 RPC만을 이용하면, 해상도에 버금가는 정확도의 대측척 수치지도 작성에는 한계가 있다. 따라서 하위레벨 고해상도 위성영상의 위치결정 정확도 향상을 위해 정밀관측 기준점을 이용한 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 제시된 방법들은 제공받은 RPC를 수정·갱신하는 방법(Di 등, 2003; Grodecki 등, 2003; 안기원 등, 2002; 이재민 등, 2003; 장준목 등, 2003; 이효성 등, 2004), 제공되는 RPC를 활용하지 않고 Direct Linear Transformation(DLT)나 평행투영 변환방법 등을 이용한 경우(Fraser 등, 2004; 김의명 등, 2005) 등으로 나눌 수 있다. RPC 수정·갱신 방법은 소수의 기준점만으로도 정확도를 개선시킬 수 있다는 장점이 있으나 이를 위한 복잡한 조정방법이 요구된다. 제공 RPC를 활용하지 않는 방법은 RPC 수정·갱신 방법에 비해 계산방법이 간단하나 관측한 기준점 정보만을 이용하기 때문에 충분한 수의 기준점과 배치상태를 고려해야만 한다. 그리고 이 방법은 광학위성영상 센서모델링 방법으로 일반화하기에는 다소 무리가 따를 수 있다(Dial 등, 2005).

한편, QuickBird-2 고해상도 위성영상 이후 위성영상과 함께 제공되는 센서정보는 RPC 뿐만 아니라 위성 궤도 정보를 같이 제공할 것으로 예상되기 때문에 고해상도 위성영상의 외부표정요소(Exterior Orientation Parameter; EOP) 획득을 위한 공선조건식 기반의 물리적 센서모델링도 병행하여 연구되어야 할 것이다(DigitalGlobe, 2006). 아울러 현재 RPC 형태로 제공되는 대체센서모델도 근본적으로 위성 카메라의 EOP로부터 생산되어진 것이므로 (Grodecki 등, 2001) RPC나 EOP 둘 중 어떤 것을 선택하여 사용해도 요구되는 허용정확도내의 지형도 제작에 있어선 지상기준점이 요구될 수 있다. 이런 경우, 위성궤도정보와 RPC가 동시에 제공된다면, 사용자 입장에서는 지상기준점을 이용하여 기존에 일반화되고 정립된 공선

조건식 사용을 선호할 수도 있을 것이다. 이와 관련하여 이효성 등(2005)은 IKONOS 위성영상에서 제공하는 메타자료와 지상관측 기준점을 이용하여 EOP를 결정하였다. 이 연구는 접근이 가능한 지역인 경우, 지상기준점과 메타자료의 간단한 정보만으로도 지형도 제작을 위한 정확도의 EOP 획득이 가능하다는 것을 제시한 논문이다. 그러나 이 논문은 EOP 결정에 있어서 라인변화에 따른 최적 다항식은 제시되지 않고, 메타자료와 기준점으로부터 결정된 EOP의 신뢰성 정도만을 제시하였다. 그리고 제안방법의 타당성 검사를 위하여 일부 검사점만을 이용하였기 때문에 지형도 제작을 위한 EOP 활용가능성 파악은 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 IKONOS Geo 레벨 위성영상의 메타자료와 기준점으로부터 라인변화에 따른 EOP 최적 다항식을 제시하고, 제시된 EOP를 이용하여 IKONOS 위성영상의 복잡한 비선형적 에피플라 기하모델에 근사한 정합선(Matching Line)을 수립한 후, 이로부터 수치표고 모델(Digital Elevation Model; DEM)을 생성하고자 한다. EOP에 의한 정합선 수립방법은 Morgan(2004)과 Habib 등(2005)이 제시한 방법을 적용하였다. 이 방법은 EOP를 제공하지 않는 IKONOS 위성영상에는 적용할 수 없기 때문에 모의영상(Simulated Images)을 만들어 실험한 Morgan(2004)과 Habib 등(2005)의 논문과는 차별성을 둘 수 있다. 그리고 제안방법으로 제작한 DEM을 기존의 검증된 방법으로 제작한 DEM과 비교 검토하여 지형도 제작을 위한 제안방법의 활용 가능성을 파악하고자 한다.

2. 외부표정요소를 이용한 정합선 수립

EOP 획득을 위한 초기치 계산방법은 이효성 등(2005)이 제안한 방법을 적용하였다. 여기서 활용된 IKONOS 위성영상의 Geo 레벨 메타자료는 영상 취득 시 촬영고도각과 방위각 한 화소의 지상크기, 영상 내 귀퉁이의 WGS84 타원체 기준 UTM 평면위치 등을 제공하고 있다. 제공되는 영상의 RPC는 사용자의 주문여부에 따라 추가로 제공받을 수 있다.

본 연구에서는 RPC를 사용하지 않고 제공하는 메타자료와 지상 기준점만을 이용하여 센서라인의 변화에 따른 EOP를 결정하고, 이로부터 정합선 방정식에 의한 자동매칭을 수행하여 DEM을 생성하고자 한다. 이를 위한 EOP 초기치($X_0, Y_0, Z_0, w_0, \phi_0, \kappa_0$) 획득방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
X_0 &= E_C + D \cdot \sin\theta_A \\
Y_0 &= N_C + D \cdot \cos\theta_A \\
Z_0 (= H_s) &= 681,000m \\
w_0 &= \tan^{-1}(\Delta N / H_s) \\
\phi_0 &= \tan^{-1}(\Delta E / \Delta H_s) \\
\kappa_0 &= 0^\circ \\
D &= Z_0 / \tan\theta_E \\
\Delta N &= N_S - N_C, \Delta E = E_S - E_C
\end{aligned} \quad (1)$$

여기서, X_0, Y_0, Z_0 는 제공되는 영상의 마지막 라인 취득 시 위성의 대략적 위치, θ_A 와 θ_E 는 위성의 촬영 방위각과 고도각, E_C, N_C 는 영상 마지막 라인의 중심위치이다. w_0 와 ϕ_0 는 위성의 E 축과 N 축에 대한 회전요소이다. 그리고 H 축의 회전요소(κ_0)는 발생하지 않은 것으로 간주하였다.

그리고 IKONOS 위성의 센서와 망원렌즈 간 실제거리는 약 1.5m 정도이며, 3개의 반사거울을 이용하여 초점 거리가 10m로 확장되어 있으므로(Jurgens 등, 1999). 제시된 초점거리를 그대로 사용하기에는 다소 무리가 따를 것으로 보고, 제공되는 영상의 초점거리를 경사촬영에 의한 영상축척을 이용하여 구하였다(Fraser 등, 2004).

$$\frac{f}{Z_0 / \cos w_{ave}} = \frac{l}{L} \quad (3)$$

여기서, f = 영상의 초점거리, w_{ave} = 앞에서 구한 스테레오 영상 w_0 의 평균값, l = 한 화소의 물리적 크기, D = 한 화소의 지상크기.

센서라인 변화에 따른 EOP 다항식은 1m 급 고해상도

위성영상의 경우, 매우 빠른 속도와 좁은 시야각으로 촬영되어지므로 촬영당시 등속운동과 일정한 자세를 유지한다는 조건으로 식 (4)와 같이 결정하였으며, 이로부터 정합선을 수립하였다(Morgan, 2004).

$$\begin{aligned}
X_i &= X_1 + \Delta X_1 \cdot i & \omega_i &= \omega_1 \\
Y_i &= Y_1 + \Delta Y_1 \cdot i & \phi_i &= \phi_1 \\
Z_i &= Z_1 + \Delta Z_1 \cdot i & \kappa_i &= \kappa_1 \\
X_j &= X_2 + \Delta X_2 \cdot j & \omega_j &= \omega_2 \\
Y_j &= Y_2 + \Delta Y_2 \cdot j & \phi_j &= \phi_2 \\
Z_j &= Z_2 + \Delta Z_2 \cdot j & \kappa_j &= \kappa_2
\end{aligned} \quad (4)$$

여기서, i, j 는 첫 번째와 두 번째 영상의 스캔라인 수, X_i, Y_i, Z_i 와 X_j, Y_j, Z_j 는 첫 번째와 두 번째 영상의 카메라 위치, X_1, Y_1, Z_1 과 X_2, Y_2, Z_2 는 첫 번째와 두 번째 영상의 등속운동에 따른 라인의 일정한 위치변화량, $\omega_1, \phi_1, \kappa_1$ 과 $\omega_2, \phi_2, \kappa_2$ 은 모든 라인에 대한 회전각은 일정하다는 조건의 첫 번째와 두 번째 영상 회전각이다.

식 (4)로부터 정합선 수립을 위한 구체적 방법은 다음과 같다.

먼저 두 번째 영상의 공선조건(식 (5))으로부터 지상좌표 X, Y 에 대하여 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
x_j - x_{0j} &= -f \frac{m_{31}(X - X_j) + m_{32}(Y - Y_j) + m_{33}(Z - Z_j)}{m_{31}(X - X_j) + m_{32}(Y - Y_j) + m_{33}(Z - Z_j)} \\
y_j - y_{0j} &= 0 = -f \frac{m_{21}(X - X_j) + m_{22}(Y - Y_j) + m_{23}(Z - Z_j)}{m_{31}(X - X_j) + m_{32}(Y - Y_j) + m_{33}(Z - Z_j)}
\end{aligned} \quad (5)$$

여기서, x_j, y_j 는 두 번째 영상의 임의 지점에 대한 영상 맨 마지막 라인(y_{0j})과 칼럼중심(x_{0j})으로부터의 영상좌표(칼럼과 라인)이며, 한 개의 선형 푸쉬브room(Pushbroom) 스캐너로부터 취득된 영상인 경우, $y_i - y_{0j} = 0$ 이다. 그리고

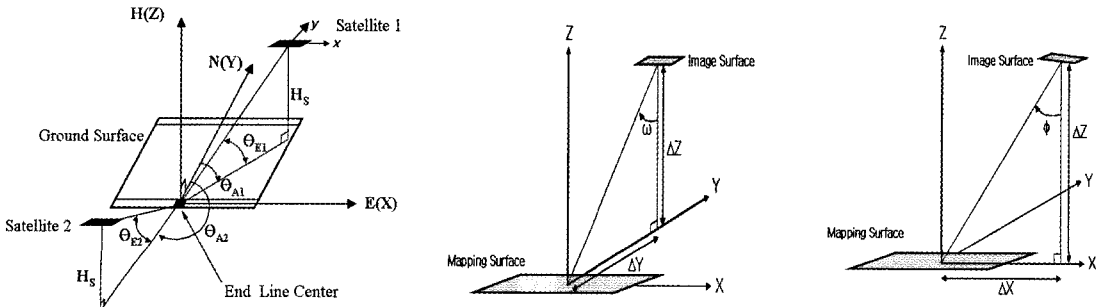


그림 1. EOP 초기치 계산을 위한 IKONOS 위성의 촬영기하

$m_{11} \cdots m_{33}$ 은 임의의 라인에서 카메라 중심에 대한 회전 행렬요소, X, Y, Z 는 영상좌표와 일치하는 임의 지점의 지상좌표이다.

$$\begin{aligned}
 X &= \left[\frac{m_{j11}(x_j - x_{0j}) + m_{j31}(-f)}{m_{j31}(x_j - x_{0j}) + m_{j33}(-f)} \right] \cdot Z \\
 &+ \left[X_j - Z_j \cdot \frac{m_{j11}(x_j - x_{0j}) + m_{j31}(-f)}{m_{j31}(x_j - x_{0j}) + m_{j33}(-f)} \right] \\
 Y &= \left[\frac{m_{j12}(y_j - y_{0j}) + m_{j32}(-f)}{m_{j31}(y_j - y_{0j}) + m_{j33}(-f)} \right] \cdot Z \\
 &+ \left[Y_j - Z_j \cdot \frac{m_{j12}(y_j - y_{0j}) + m_{j32}(-f)}{m_{j31}(y_j - y_{0j}) + m_{j33}(-f)} \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

식 (6)을 간단히 하면, 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$X = A_1 \cdot Z + A_2, \quad Y = A_3 \cdot Z + A_4 \quad (7)$$

식 (7)의 $X = A_1 \cdot Z + A_2$, $Y = A_3 \cdot Z + A_4$ 는 첫 번째 영상에서도 동일한 지점이므로 첫 번째 영상의 공선조건(식 (8))에 대입한 후, Z 에 관한 식으로 전개하면, 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_i - x_{0i} &= -f \frac{m_{i11}(X - X_1 - \Delta X_1 \cdot i) + m_{i12}(Y - Y_1 - \Delta Y_1 \cdot i) + m_{i13}(Z - Z_1 - \Delta Z_1 \cdot i)}{m_{i31}(X - X_1 - \Delta X_1 \cdot i) + m_{i32}(Y - Y_1 - \Delta Y_1 \cdot i) + m_{i33}(Z - Z_1 - \Delta Z_1 \cdot i)} \\
 y_i - y_{0i} &= -f \frac{m_{i21}(X - X_1 - \Delta X_1 \cdot i) + m_{i22}(Y - Y_1 - \Delta Y_1 \cdot i) + m_{i23}(Z - Z_1 - \Delta Z_1 \cdot i)}{m_{i31}(X - X_1 - \Delta X_1 \cdot i) + m_{i32}(Y - Y_1 - \Delta Y_1 \cdot i) + m_{i33}(Z - Z_1 - \Delta Z_1 \cdot i)} \quad (8) \\
 x_i - x_{0i} &= -f \frac{B_1 \cdot Z - B_2 \cdot i + B_3}{B_7 \cdot Z - B_8 \cdot i + B_9} \\
 y_i - y_{0i} &= -f \frac{B_4 \cdot Z - B_5 \cdot i + B_6}{B_7 \cdot Z - B_8 \cdot i + B_9} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{여기서, } B_1 &= m_{i11} \cdot A_1 + m_{i12} \cdot A_3 + m_{i13} \\
 B_2 &= m_{i11} \cdot \Delta X_1 + m_{i12} \cdot \Delta Y_1 + m_{i13} \cdot \Delta Z_1 \\
 B_3 &= m_{i11} \cdot A_2 - m_{i11} \cdot X_1 + m_{i12} \cdot A_4 - m_{i12} \cdot Y_1 - m_{i13} \cdot Z_1 \\
 B_4 &= m_{i21} \cdot A_1 + m_{i22} \cdot A_3 + m_{i23} \\
 B_5 &= m_{i21} \cdot \Delta X_1 + m_{i22} \cdot \Delta Y_1 + m_{i23} \cdot \Delta Z_1 \\
 B_6 &= m_{i21} \cdot A_2 - m_{i21} \cdot X_1 + m_{i22} \cdot A_4 - m_{i22} \cdot Y_1 - m_{i23} \cdot Z_1 \\
 B_7 &= m_{i31} \cdot A_1 + m_{i32} \cdot A_3 + m_{i33} \\
 B_8 &= m_{i31} \cdot \Delta X_1 + m_{i32} \cdot \Delta Y_1 + m_{i33} \cdot \Delta Z_1 \\
 B_9 &= m_{i31} \cdot A_2 - m_{i31} \cdot X_1 + m_{i32} \cdot A_4 - m_{i32} \cdot Y_1 - m_{i33} \cdot Z_1
 \end{aligned}$$

식 (9)의 두 번째 식을 Z 에 관한 식으로 정리하면, 식 (10)을 얻을 수 있고,

$$Z = \left[\frac{(y_i - y_{0i}) \cdot B_8 + f \cdot B_5}{(y_i - y_{0i}) \cdot B_7 + f \cdot B_4} \right] \cdot i + \left[\frac{-(y_i - y_{0i}) \cdot B_9 - f \cdot B_6}{-(y_i - y_{0i}) \cdot B_7 + f \cdot B_4} \right] \quad (10)$$

식 (10)에서 $y_i - y_{0i} = 0$ 이므로(식 (5)), 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = \left[\frac{B_5}{B_4} \right] \cdot i + \left[\frac{B_6}{B_4} \right] \quad (11)$$

식 (11)을 $\frac{B_5}{B_4} = D_1$, $\frac{-B_6}{B_4} = D_2$ 로 간단히 한 후, 식 (9)의 첫 번째 식에 대입하면, 식 (12)을 얻을 수 있다.

$$x_i - x_{0i} = -f \frac{B_1 \cdot (D_1 \cdot i + D_2) - B_2 \cdot i + B_3}{B_7 \cdot (D_1 \cdot i + D_2) - B_8 \cdot i + B_9} \quad (12)$$

식 (12)을 x_i 와 i 에 관한 식으로 정리하면, 식 (13)과 같이 되고,

$$\begin{aligned}
 x_i [(B_9 + D_2 \cdot B_7)] + x_i \cdot i [(D_1 \cdot B_7 - B_8)] \\
 = i [x_{0i} \cdot (D_1 \cdot B_7 - B_8) - f \cdot (D_1 \cdot B_1 - B_2)] \\
 + [x_{0i} \cdot (B_9 + D_2 \cdot B_7) - f \cdot (B_3 - D_2 \cdot B_1)] \quad (13)
 \end{aligned}$$

식 (13)을 간단히 하면, $x_i \cdot E_1 + x_i \cdot i \cdot E_2 = i \cdot E_3 + E_4$ 와 같이 나타낼 수 있으며, x_i 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같은 정합선 방정식을 얻을 수 있다.

$$x_i = \frac{E_4 + E_3 \cdot i}{E_1 + E_2 \cdot i} \quad (14)$$

식 (14)에서 E_1, E_2, E_3, E_4 와 첫 번째 영상의 라인좌표 (i)를 이용하여 두 번째 영상좌표에 대응하는 첫 번째 영상의 칼럼좌표(x_i)를 구할 수 있다. 그러나 i 를 구하기 위해선 식 (11)에서 정확한 높이(Z)를 알아야 하지만 Z 값을 알 수 없으므로 대상지역내 최소높이(Z_{\min})와 최고높이(Z_{\max}) 범위를 고려하여 구해야만 한다. 만일 식 (14)의 정합선 방정식이 곡선에 가까우면, Z 의 범위를 여러 개로 나누어서 첫 번째 영상좌표(x_i, i)를 여러 개로 구해야 하는 번거로움이 있다. 그러나 Along-Track 방식으로 취득되면서 촬영고도가 높고 촬영각이 좁은 스테레오 영상은 에피폴라 곡선이 직선에 가깝다고 전한다(Morgan, 2005; 김의명 등, 2005). 따라서 IKONOS 스테레오 영상에서

정합선 방정식을 직선으로 간주하고 Z 값은 Z_{min} 과 Z_{max} 만을 고려하여 이에 대응하는 i, x_i 구한 후, 직선의 방정식으로 모델링 하였으며, 이를 자동매칭에 이용하였다. 정합선 방정식을 이용한 자동매칭의 구체적 순서는 이해연 등(2002)과 손홍규 등(2005)이 제안한 방법과 유사하며, 다음과 같다.

첫 번째, 메타자료와 기존 지형도 등을 이용하여 대상지의 Z_{min}, Z_{max} 선정한다.

두 번째, Z_{min}, Z_{max} 를 식 (11)에 대입하여 Z_{min} 일 때의 $i(=i_{min}), Z_{max}$ 일 때의 $i(=i_{max})$ 를 구한다.

세 번째, 앞에서 구한 i_{min}, i_{max} 를 식 (14)에 대입하여 i_{min} 일 때의 $x_i(=x_{i_{min}}), i_{max}$ 일 때의 $x_i(=x_{i_{max}})$ 를 구한다.

마지막으로, $i_{min}, i_{max}, x_{i_{min}}, x_{i_{max}}$ 을 이용하여 식 (15)와 같은 직선의 방정식으로 모델링 한다. 여기서, i 는 $x_{i_{min}}$ 과 $x_{i_{max}}$ 사이의 값으로서 한 화소 또는 그 이상의 간격으로 입력하여 x_i 를 구한다. 구한 $i_{min} \sim i_{max}$ 범위내의 첫 번째 영상 i, x_i 주위로 탐색영역(Search Area)을 정하고 대응하는 두 번째 영상 한 점의 j, x_j 주위로 기준영역(Window Area)을 정하여 좌우 화소값의 상관계수에 의한 자동매칭을 수행한 후, 상관계수가 가장 큰 지점의 i, x_i 가 j, x_j 와 동일한 지점으로 인식한다.

$$x_i = x_{i_{min}} + \frac{x_{i_{max}} - x_{i_{min}}}{i_{max} - i_{min}} \cdot (i - i_{min}) \quad (15)$$

3. 적용실험과 비교분석

본 실험에 사용된 IKONOS 위성영상은 2001년 1월 10

일에 경남 양산시 일대(그림 2)를 지상면적 약 7km×7km 대상으로 관측·수집한 Geo 레벨의 전정색(Panchromatic) 입체영상이다(그림 3). 지상관측점은 좌·우측영상에서 동일한 30점을 대상영역 내에서 골고루 분포하게끔 선정하였다. 지상관측점의 지상좌표 획득에 있어서는 GPS 수신기 LEICA SR9500, Geotracer, DSNP 총 10대를 가동하여 정적현장관측방법(Static Survey)으로 한 측점 당 1시간 이상 자료를 수신하였으며, 국립지리원 3, 4등 삼각점 3점과 1등 수준점 2점을 연결하여 상대측위법에 의한 삼각측량 방식으로 지상좌표를 획득하였다. 지상관측점과 동일한 지점의 영상좌표는 ERDAS IMAGINE 소프트웨어(ver. 8.7)를 사용하여 화소이하의 단위로 독취 하였다. 획득한 현지 지상관측점 중 10점은 EOP 결정을 위한 기준점으로, 20점은 EOP 결정 정확도 확인을 위한 검사점

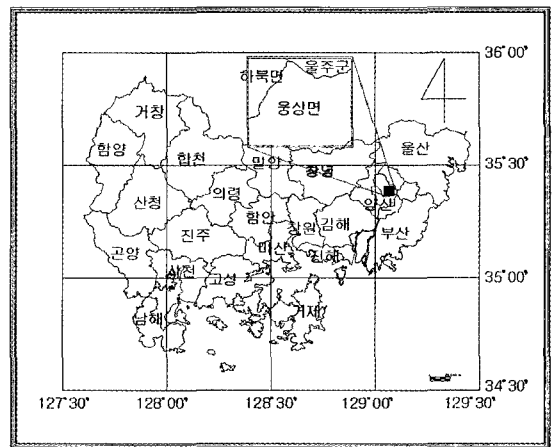


그림 2. 실험에 사용된 IKONOS 위성영상의 촬영 대상지역

표 1. 실험에 사용된 IKONOS 위성영상 제원

Image	First Image	Second Image
Nominal Collection Azimuth	18.5512°	187.2200°
Nominal Collection Elevation	73.345000°	74.40065°
Acquisition Date/Time	2001-01-10/02:06 GMT	2001-01-10/02:07 GMT
Image Size	7004 pixels × 7004 pixels	7001 pixels × 7001 pixels
Product Level	Geo	
Altitude/Pixel Size	681 kilometer/1 meter	
Datum/Map Projection	WGS84/UTM	
Map Coordinates	Upper Left X(Easting)= 510,436.13 meter Upper Left Y(Northing)= 3,922,521.93 meter Lower Left X(Easting)= 517,436.13 meter Lower Left Y(Northing)= 3,915,521.93 meter	

으로 활용하였다(그림 3).

표 1은 실험에 사용된 IKONOS 위성영상 메타자료의 대략적 정보를 나타낸 것이다. 그림 3의 좌측은 IKONOS 위성의 첫 번째 촬영영상과 지상관측점을 나타낸 것이고, 우측그림은 DEM 추출지역을 확대하여 나타낸 것이다. DEM 추출지역은 도심지, 산림, 농경지, 하천, 택지개발 용지 등이 골고루 포함되어 있도록 선정하였다.

EOP 초기치 계산을 위해, 영상의 마지막 라인, 칼럼중앙지점 촬영시 위성의 대략적 위치(X_0, Y_0, Z_0)를 식 (1)으로부터 구하였다. 3축에 대한 회전량($\omega_0, \phi_0, \kappa_0$)은 앞에서 구한 위성위치와 제공영상의 지상좌표로부터 식 (1)을 이용하여 구하였다. 그리고 IKONOS 위성의 촬영고도(681,000m), Charge Coupled Device(CCD) 한 화소의 물리적 크기(12 μ m), 한 화소의 제공되는 실제크기(1m) 및 촬영경사각(ω_0)을 이용하여 초점거리를 계산한 결과, 약 8.5m

였다. Geo 레벨로 수정되기 이전 영상의 경우, Ground Sample Distance(GSD: 0.82m)를 적용하면 초점거리는 거의 10m가 되나 제공되는 영상의 경우, 한 화소의 실제 크기가 1m로 수정·제작 되었으므로 수정된 값을 고려하였다.

앞에서 구한 초점거리와 EOP 초기치, 지상기준점을 이용하여 변들조정으로 영상라인의 변화에 따른 EOP 다항식을 결정하였다. EOP 적용 다항식은 고해상도 위성영상의 경우, 등속운동에 따라 라인증가 대비 EOP의 카메라 위치는 일정하게 증가한다고 가정하여 일차 다항식으로 고정시켰으며, EOP의 회전요소만 상수항부터 2차 다항식까지 증가시키면서 모델링하였다(표 2). EOP 적용 다항식에 따른 위치결정 정확도 파악을 위해 이로부터 검사점의 지상좌표를 획득한 후, 현지 관측한 위치와의 차이를 구하였다. 그리고 결정된 EOP의 비교·검토를 위해

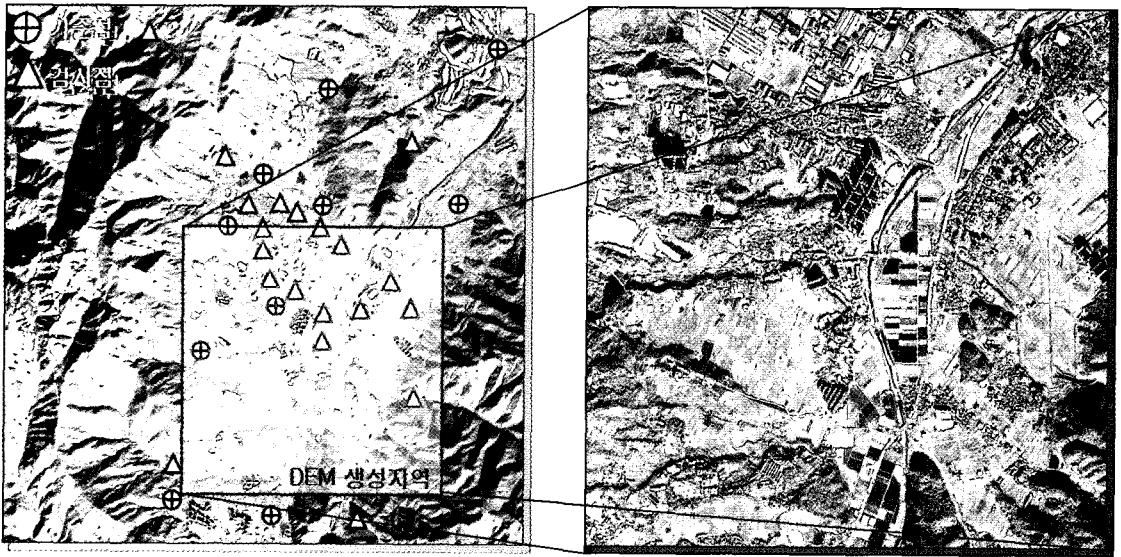


그림 3. IKONOS 위성의 첫 번째 영상, GPS 지상 관측점 및 DEM 추출을 위한 샘플지역

표 2. IKONOS 위성영상의 라인변화에 따른 외부표정요소 다항식

EOPs	Case 1	Case 2	Case 3
X_L (m)	$X_1 + \Delta X_1 \cdot L$	$X_1 + \Delta X_1 \cdot L$	$X_1 + \Delta X_1 \cdot L$
Y_L (m)	$Y_1 + \Delta Y_1 \cdot L$	$Y_1 + \Delta Y_1 \cdot L$	$Y_1 + \Delta Y_1 \cdot L$
Z_L (m)	$Z_1 + \Delta Z_1 \cdot L$	$Z_1 + \Delta Z_1 \cdot L$	$Z_1 + \Delta Z_1 \cdot L$
ω_L (rad)	ω_1	$\omega_1 + \Delta \omega_1 \cdot L$	$\omega_1 + \Delta \omega_1 \cdot L + \Delta \omega_2 \cdot L^2$
ϕ_L (rad)	ϕ_1	$\phi_1 + \Delta \phi_1 \cdot L$	$\phi_1 + \Delta \phi_1 \cdot L + \Delta \phi_2 \cdot L^2$
κ_L (rad)	κ_1	$\kappa_1 + \Delta \kappa_1 \cdot L$	$\kappa_1 + \Delta \kappa_1 \cdot L + \Delta \kappa_2 \cdot L^2$

RPC 최소제곱조정방법을 적용한 후, 동일 검사점에 대한 지상좌표를 획득하고, 그 오차를 구하였다(표 3, 그림 4). 그 결과, 3가지 EOP는 $\pm 3\text{m}$ 오차범위 이내로써 모두 유사한 결과 정확도를 나타내고 있으며, 기존의 검증된 RPC 최소제곱조정 결과와도 비슷한 오차크기를 보이고 있다. 특히 3가지 EOP는 회전요소 차수를 증가시킬수록 오차가 오히려 조금씩 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 IKONOS 위성과 같은 고해상도 위성영상에서 정합선 수립을 위해, 최적 EOP의 위치는 라인변화에 따른 일차다항식, 회전요소는 상수항만을 적용해도 충분한 위치 정확도가 유지되고, 이는 기존의 검증된 방법과 유사한 결과 오차를 나타냈다.

결정된 최적 EOP를 적용하여 정합선을 수립하였다. 이로부터 정합선을 구하기 위해, 대상영역의 Z 값은 기존 지형도와 메타자료의 정보를 이용하여 $Z_{\min} = 10\text{m}$, $Z_{\max} = 700\text{m}$ 값을 고려하고, 식 (11)으로부터 라인좌표(i)의 범위를 구한 후, 한 라인씩 증가 시키면서 식 (14)를 이용하여 칼럼좌표(x_i)를 구하였다. 그림 5는 두 번째 영상 기준점 10점에 대응하는 첫 번째 영상의 정합선을 MATLAB(ver. 6.5)으로 플로팅(Plotting) 한 모습이다. 그리고 정합선의 직선여부를 알아보기 위해 일부 기준점에 대하여 Z 범위를 무한대로 설정한 후, 정합선을 구하였다(그림 5의 맨 우측). 그림 6은 정합선과 실측한 기준점 영상좌표의 일치도 파악을 위해 그래프(가로축: 칼럼좌표, 세로축: 라

표 3. 검사점의 지상좌표 오차(단위: meter)

	Case 1 of EOPs		Case 2 of EOPs		Case 3 of EOPs		Bias-Corrected RPCs	
	RMSE	Maximum Error	RMSE	Maximum Error	RMSE	Maximum Error	RMSE	Maximum Error
X	0.722	-1.551	0.718	-1.582	0.723	-1.631	1.106	2.632
Y	0.921	1.828	0.917	1.921	1.086	-2.436	0.934	1.837
Z	1.153	2.448	1.137	2.674	1.177	2.864	0.945	-1.714

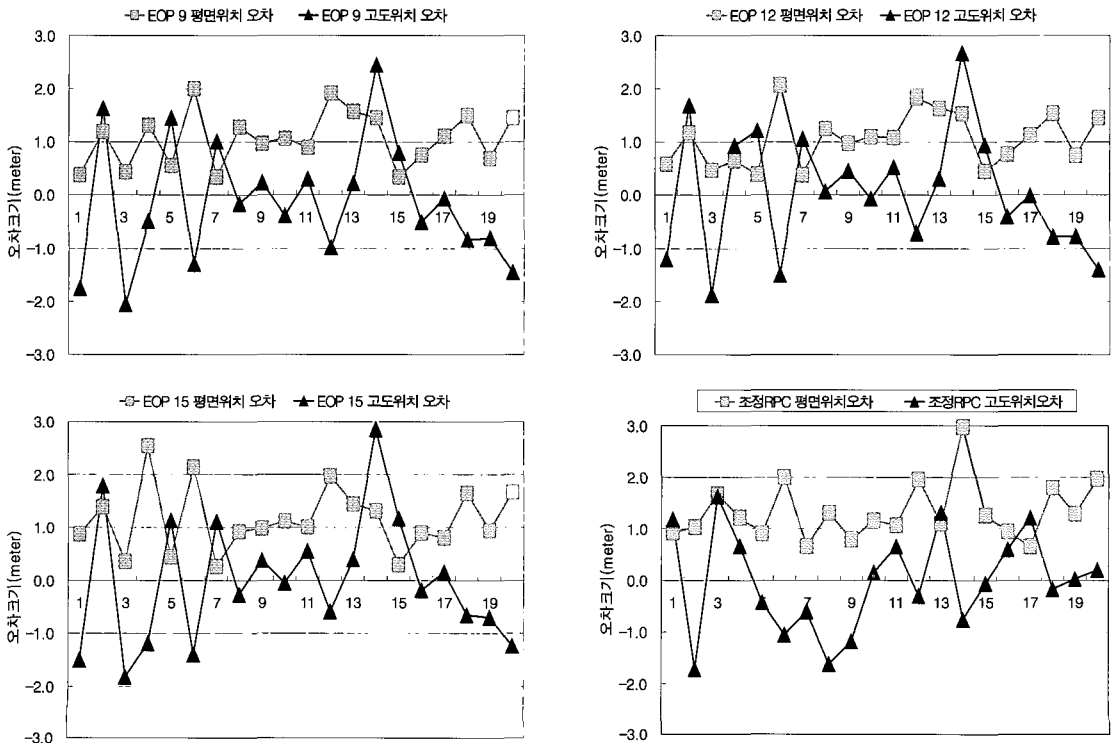


그림 4. EOP 적용 다항식별 검사점 오차 및 RPC 최소제곱조정에 의한 검사점 오차

인좌표)로 나타낸 것이다. 그림 5와 6에서 보는바와 같이, 10개 기준점의 정합선이 모두 직선 형태인 것을 알 수 있으며, 식 (11), (14)에서 Z 의 범위를 무한대로 입력하여도 정합선은 직선 형태로 나타났다. 그리고 10개 기준점의

실측 영상좌표는 플로팅 된 정합선상에 거의 일치하였다. 따라서 정합선을 직선의 방정식(식 (15))으로 모델링하여 자동매칭해도 된다는 것을 알 수 있다.

앞에서 구한 정합선방정식을 이용하여 샘플지역에 대

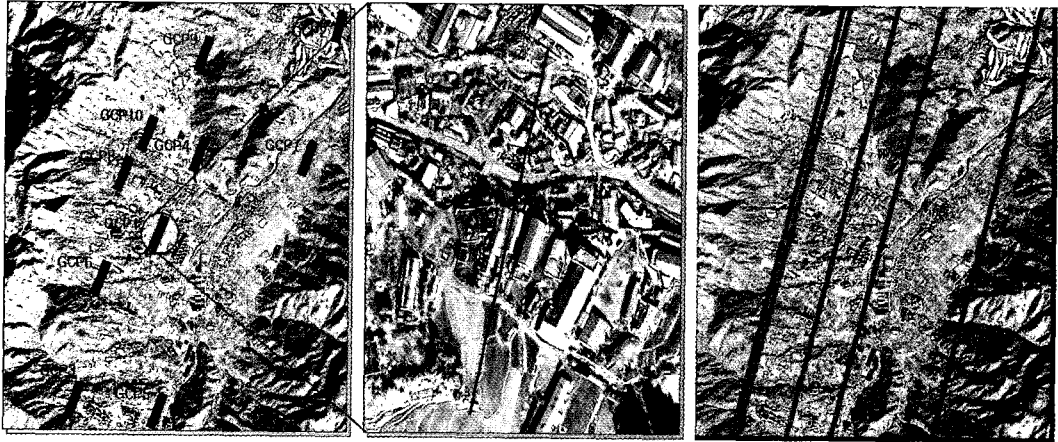
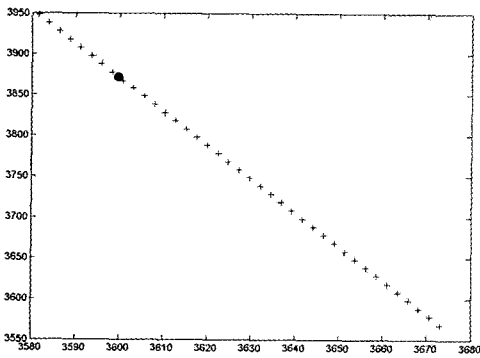
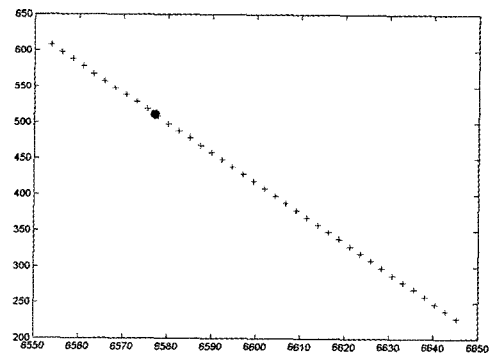


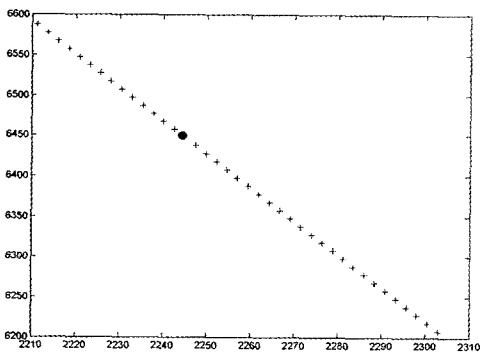
그림 5. 두 번째 영상 기준점 좌표에 대응하는 첫 번째 영상의 정합선과 확대모습 및 1,2,3,5,8번 기준점의 정합선을 무한대로 확장한 모습



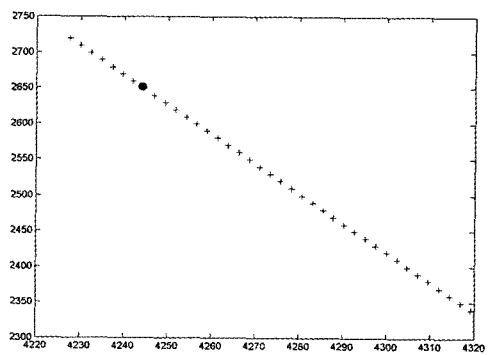
(a) 1번 기준점과 정합선



(b) 2번 기준점과 정합선



(c) 3번 기준점과 정합선



(d) 4번 기준점과 정합선

그림 6. 첫 번째 영상의 실측한 기준점 영상좌표와 정합선

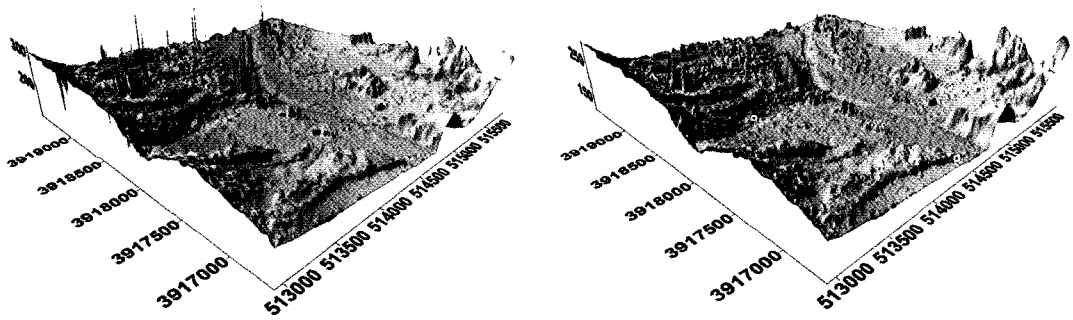


그림 7. 제안방법으로 구한 DEM과 ERDAS IMAGINE 8.7로 구한 DEM(3km×3km)

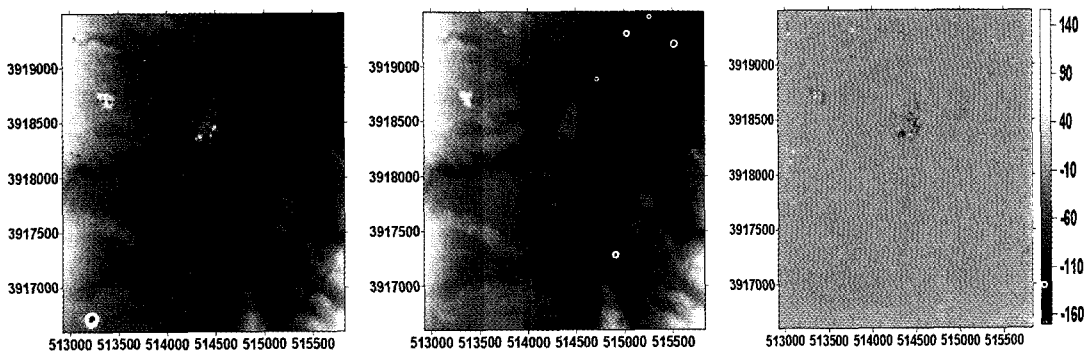


그림 8. 제안방법 DEM 영상과 ERDAS IMAGINE 8.7로 구한 DEM 영상 및 두 방법으로 제작한 DEM의 높이차 영상

한 영역기반매칭방법을 적용하여 5m 간격의 DEM을 제작하였다(그림 7의 좌측). 그러나 제작한 DEM 영역은 도심지가 대부분이기 때문에 1:5,000 수치지도로 작성한 기준 DEM과는 비교하기 힘들었다. 따라서 제안방법의 비교·검토를 위해, 지상기준점으로 RPC 최소제곱조정 방법을 적용한 후, ERDAS IMAGINE 소프트웨어(ver. 8.7)의 RPC에 의한 DEM 작성용 툴(Tool)을 이용하여 동일 샘플지역에 대한 5m 간격의 DEM을 획득하였다(그림 7의 우측). 그림 7만으로 비교할 때, 본 연구에서 제작한 DEM은 오정합에 의한 과대오차를 가진 소수지점을 제외하면 ERDAS IMAGINE으로 작성한 DEM과 거의 차이가 없음을 시각적으로 확인할 수 있으며, 지표면의 특성을 잘 반영하는 것으로 판단되어진다. 그림 8의 높이차 영상에서 보는바와 같이, 차이 값이 대부분 0에 가깝다는 것을 파악할 수 있다. 여기서, 높이차의 평균은 0.5m, 표준편차는 4.3m, 최대 차는 170m로 나타났다. 이 결과만으로 판단했을 경우, 오정합에 의한 최대 차를 제외하면 비교적 만족할 만한 결과라고 판단되며, 본 연구에서 제시한 방법이 기존방법과 유사한 결과 정확도를 나타낸다

고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 IKONOS Geo 레벨 위성영상의 메타자료로부터 EOP 초기치를 구하고, 이와 지상기준점을 이용하여 라인변화에 따른 3가지 경우의 EOP 다항식을 결정하였다. 결정된 3가지 경우의 EOP 다항식으로부터 검사점 20점의 지상좌표를 구한 결과, 평균제곱근 오차는 $\pm 1.0\text{m}$ 내외, 최대오차는 $\pm 3\text{m}$ 를 넘지 않았다. 그리고 결정된 최적 EOP의 위치는 일차다항식, 회전요소는 상수항만을 적용해도 충분한 위치결정 정확도를 보였으며, 기존의 검증된 RPC조정 방법과 유사한 결과오차를 보였다. 이는 기존 중·저 해상도에 적용되어 온 EOP 고차다항식에 비해 고해상도 위성영상의 물리적 센서모델을 위한 적용 기준점 수가 적게 들어간다는 장점이 있다.

또한 결정된 EOP로부터 수립한 정합선은 거의 직선에 가깝다는 것을 파악하였으며, 정합선을 직선의 방정식으로 모델링하여 자동매칭해도 된다는 것을 입증하였다. 그

리고 이로부터 자동매칭하여 획득한 DEM과 ERDAS IMAGINE으로 작성한 DEM을 비교한 결과, 높이차의 표준편차는 4.3m, 평균은 0.5m로 0에 가까웠다. 따라서 본 연구에서 제작한 DEM은 과대오차를 가진 소수지점을 제외하면, 기존방법과 유사한 결과 정확도를 나타냈다. 이를 토대로 우리나라의 KOMPSAT-2호 고해상도 위성영상의 물리적 센서모델링에 의한 DEM 제작에도 활용 가능하리라 판단한다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-037-D00023).

참고문헌

- 강준목, 이용욱, 박준규 (2003), RPC와 GCP를 이용한 IKONOS 위성영상의 기하보정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 21권, 제 2호, pp. 165-172.
- 김의명, 함창학 (2005), 위성영상의 에피플라 기하특성 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목회, 제 25권, 제 2D호, pp. 347-352.
- 손홍규, 박정환, 장훈 (2005), 구간정합선과 다항식비례모형을 활용한 수치고도모형의 제작, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 25권, 제 1D호, pp. 179-188.
- 안기원, 임환철, 서두천 (2002), 고해상도 인공위성 영상데이터의 기하보정을 위한 RFM의 적용, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 20권, 제 2호, pp. 155-164.
- 이재빈, 광태석, 김용일 (2003), IKONOS 영상으로부터 추출되는 3차원 지형자료의 정확도 향상에 관한 연구 - RPC 모델의 위치정확도 보정을 통하여, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 21권, 제 4호, pp. 301-308.
- 이해연, 박원규 (2002), 선형 Pushbroom 영상의 에피플라 기하 모델 수립을 위한 간소화된 방법론, 원격탐사학회지, 원격탐사학회, 제 18권, 제 2호, pp. 97-105.
- 이효성, 신석효, 안기원 (2004), 수치지도를 이용한 IKONOS Geo-level 위성영상의 편위보정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 22권, 제 4호, pp.331-338.
- 이효성, 안기원, 유기윤, 신석효 (2005), IKONOS 위성영상의 물리적 센서모델링, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 25권, 제 6D호, pp. 907-913.
- Dial, G. (2005), RPC Replacement Camera Models, Proceedings of American Society for Photogrammetry & Remote Sensing Annual Conference, ASPRS, Baltimore, Maryland, CD-ROM.
- Di, K., Ma, R. and Li, R. X. (2003), Rational Functions and Potential for Rigorous Sensor Model Recovery, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, ASPRS, Vol. 69, No. 1, pp. 33-41.
- Digital Globe (2006), QuickBird Imagery Products, Digital Globe, Longmont, http://www.digitalglobe.com/product/product_docs.shtml
- Fraser, C. S. and Yamakawa, T. (2004), Insights into the Affine Model for High-Resolution Satellite Sensor Orientation, ISPRS Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS, Vol. 58, pp. 275-288.
- Grodecki J. and Dial, G. (2001), IKONOS Geometric Accuracy, GeoEye, Dulles, <http://www.geoeye.com/techpapers/default.htm>
- Grodecki, J. and Dial, G. (2003), Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, ASPRS, Vol. 69, No. 1, pp. 59-68.
- Habib, A. F., Morgan, M. F., Jeong, S. and Kim, K. O. (2005), Epipolar Geometry of Line Cameras Moving with Constant Velocity and Attitude, ETRI Journal, ETRI, Vol. 27, No. 2, pp. 172-180.
- Jurgens, F. and Rochester, N.Y. (1999), Picture Perfect - It will be the ultimate Kodak moment when the IKONOS satellite captures its first 1-meter image, Imaging notes, Denver, <http://www.imagingnotes.com/marapr99>.
- Morgan M. (2004), Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, <http://www.geomatics.ucalgary.ca/links/GradTheses.html>.
- OGC(OpenGIS Consortium) (1999), The OpenGIS Specification Model-Topic: The Earth Imagery Case, Open Geospatial Consortium(OGC), Wayland, <http://www.opengis.org/techno/abstract/99-107.pdf>.

(접수일 2006. 10. 19, 심사일 2006. 10. 27, 심사완료일 2006. 10. 30)